

混合型・成層型貯水池での潜入密度流の 水理特性について

FLOW CHARACTERISTICS OF PLUNGE FLOWS IN WELL-MIXED AND STRATIFIED RESERVOIRS

秋山壽一郎¹・片山哲幸²・西 恭太²・土居正明²

Juichiro AKIYAMA, Tetuyuki KATAYAMA, Kyouta NISHI and Masaaki DOI

¹正会員 Ph.D 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550北九州市戸畑区仙水町1-1)

²学生員 九州工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

Flow characteristics of plunge flows in well-mixed and stratified reservoirs are investigated experimentally. The study is directed towards the estimation of the densimetric Froude number F_p at the plunge point and the initial mixing rate γ . The internal critical slope I_c is found to be about 1/50. It is shown that the values of F_p in well-mixed reservoirs are strongly affected by the inflow densimetric Froude number F_0 and the channel slope I when plunging takes place near the inlet of a reservoir, whereas F_p becomes a constant value of 0.5 in both mild and steep channels when these effects are less pronounced, and that for the range of $I=1/150\sim1/30$ is quantified as a linear function of I . It is also found that the values of F_p in well-mixed reservoirs with a steep channel are also well approximated as 0.5 when F_0 is more than about 2.0.

Key Words: reservoir, density current, plunge flow, water quality, initial mixing

1. はじめに

湖沼やダム貯水池のような閉鎖性水域の水質は流入・流出水の影響を受ける¹⁾。この傾向は貯水池で特に強い。出水時の濁質や温度差のため、負の浮力をもった河川水が池内に流入すると、貯水池上流端で表層水に潜り込む、いわゆる潜入現象が発生する。この潜入現象は、赤潮物質の集積機構や流入濁水の挙動等の貯水池における様々な水質問題と深く関わっている。このため、数多くの研究がこれまでなされてきた。淡水赤潮と潜入密度流との関係について調べた研究に限ってみても、現地観測や多層モデルに基づく数値解析など枚挙にいとまがない^{2)~7)}。しかし、後述するように、潜入密度流の水理特性が必ずしも十分に解明されているわけではない。

潜入密度流の流動特性量としては、潜入水深 h_p 、初期混合量、潜入区間長 x_m 、界面形状などがあるが、その中でも特に潜入水深と初期混合量が重要である。初期混合量については、2層流モデルに基づき、連行係数を用いて算定する方法^{例えは8)}、潜入密度流領域での周囲水の単位幅当たりの総連行量 q_c として捉え、初期混合率 γ で評価する方法がある。後者は実用的である等の理由で、これまで多くの研究で、これが用いられている^{例えは9)~13)}。本研究でもこの定義を用いる。

等幅矩形断面水路では、 h_p と γ はそれぞれ式(1)と

式(2)のように定義される。ここに、 F_p =潜入点での内部Froude数($= (q_0^2 / \epsilon_0 g h_p^3)^{1/2}$)および h_c =内部限界水深($= (q_0^2 / \epsilon_0 g)^{1/3}$)である。ここで、 q_0 =単位幅流入流量、 $\epsilon_0 = (\rho_0 - \rho_a) / \rho_a$ 、 g =重力加速度、 ρ_0 と ρ_a はそれぞれ流入水と周囲水の密度である(図-1参照)。

$$h_p / h_c = F_p^{-2/3} \quad (1) \quad ; \quad \gamma = q_c / q_0 \quad (2)$$

潜入点についてはこれまで多くの研究が重ねられている^{8)~22)}。等幅矩形断面水路を用いた室内実験データの中から、水路床勾配 I との関係がわかっているデータに基づき、これまでの知見を総括すると、 F_p は $I=1/60\sim1/3$ の範囲で約0.25~1.0の範囲の値を取り、平均的には $F_p \approx 0.56$ 程度の値となる¹⁾。この平均値は、Savage & Brimberg²⁰⁾によって理論的に得られた $F_p=0.50$ や福岡ら⁸⁾によって半理論的に得られた $F_p \approx 0.50$ に近い。有田・塚原²¹⁾も $I=1/50$ 程度では $F_p \approx 0.50$ で近似できると指摘している。また、Akiyama & Stefan^{11), 12)}は、等幅矩形断面水路ではないが、片側の側壁の拡がり角度が $1^\circ \sim 7^\circ$ の範囲での水平漸拡水路での F_p 値は、流入水路幅と潜入点の水路幅が充分大きくなると、 $F_p \approx 0.50$ になることを示している。このように、ある条件が満たされれば、 $F_p \approx 0.50$ になると推察される。しかし、実際には、福岡ら⁸⁾の実験結果では $I=1/60$ で $F_p=0.38\sim0.65$ 、有田・塚

表-1A 実験条件

CASE	I	h_0 (cm)	ε_0	q_0 (cm ² /s)	h_p (cm)	F_0	F_p
A-1-1-1	1/30	5.0	0.0007	10	7.4	1.08	0.62
A-1-1-2				12.5	8.6	1.35	0.62
A-1-1-3				15	9.8	1.62	0.60
A-1-2-1			0.0012	15	8.0	1.24	0.61
A-1-2-2				17.5	9.0	1.44	0.60
A-1-2-3				20	9.9	1.65	0.59
A-1-3-1		5.0	0.00175	15	7.1	1.02	0.61
A-1-3-2				17.5	7.85	1.20	0.60
A-1-3-3				20	8.6	1.37	0.62
A-2-1-1	1/50	5.0	0.0007	8	6.6	0.86	0.57
A-2-1-2				10	7.6	1.08	0.57
A-2-1-3				12	9.0	1.30	0.54
A-2-2-1		2.4	0.001	5	4.7	1.36	0.49
A-2-2-2				7	5.5	1.90	0.55
A-2-2-3				9	6.7	2.45	0.52
A-2-2-4				11	7.8	2.99	0.51
A-2-2-5				13	8.1	3.53	0.56
A-2-2-6				15	9.1	4.08	0.55
A-3-1-1	1/60	5.0	0.0007	6.5	6.4	0.50	0.35
A-3-1-2				8.0	7.1	0.50	0.38
A-3-1-3				10	7.6	0.57	0.39
A-3-2-1		2.4	0.001	5	4.7	1.36	0.49
A-3-2-2				7	5.7	1.90	0.51
A-3-2-3				9	6.5	2.45	0.55
A-3-2-4				11	7.4	2.99	0.56
A-3-2-5				13	8.4	3.53	0.54
A-3-2-6				15	9.5	4.08	0.52
A-4-1-1	1/80	5.0	0.0007	4.5	6.1	0.49	0.36
A-4-1-2				5.5	6.5	0.59	0.40
A-4-1-3				7.0	7.6	0.76	0.39
A-4-2-1			0.0012	7.0	6.3	0.58	0.42
A-4-2-2				8.5	6.5	0.70	0.47
A-4-2-3				10	7.5	0.82	0.45
A-4-3-1		2.4	0.00175	10	6.5	0.68	0.45
A-4-3-2				11.5	6.8	0.79	0.48
A-4-3-3				13	7.6	0.89	0.47
A-4-4-1			0.02	25	5.0	1.52	0.50
A-4-4-2				35	6.3	2.13	0.50
A-4-4-3				40	6.7	2.43	0.52
A-4-4-4				50	7.5	3.04	0.55
A-4-4-5				60	8.5	3.65	0.54
A-4-4-6				65	9.0	3.95	0.54
A-4-4-7				75	10.3	4.56	0.51

原²¹⁾でもI=1/50で $F_p=0.405\sim0.784$ の値を取っている。Lee & Yu⁹⁾は、I=1/50で潜初期には $F_p=1.0$ となるが、安定した状態では $F_p=0.6$ 程度となると報告している。このように、 $F_p=0.5$ となる根拠あるいは条件は必ずしも明確ではない。

F_p 値がばらつく主因としては、①水路床勾配Iと流入内部Froude数 $F_0(=(q_0^2/\varepsilon_0 g h_0^3)^{1/2})$ により、流動形態が変化するため、この影響を受けること、②潜入点の位置が安定するまでに時間を要するため、実験において必ずしも安定した潜入水深が得られているとは限らないこと、

CASE	I	h_0 (cm)	ε_0	q_0 (cm ² /s)	h_p (cm)	F_0	F_p
A-5-1-1	1/110	2.4	0.02	8	2.52	0.49	0.45
A-5-1-2				15	3.47	0.91	0.53
A-5-2-1			0.05	40	4.99	1.54	0.51
A-5-2-2				50	5.98	1.92	0.49
A-5-2-3				65	7.02	2.50	0.50
A-5-2-4				75	7.87	2.88	0.49
A-6-1-1	1/150	5.0	0.0007	0.75	5.2	0.08	0.07
A-6-1-2				1.0	5.3	0.11	0.10
A-6-2-1		2.4	0.01	3.5	2.8	0.30	0.24
A-6-2-2				5.0	3.3	0.43	0.27
A-6-3-1			0.1	20	3.2	0.54	0.35
A-6-3-2				35	4.2	0.95	0.41
A-6-3-3				50	5.4	1.36	0.40
A-6-3-4				65	6.2	1.77	0.42

表-1B 実験条件

CASE	I	h_0 h (cm)	ε_0	q_0 (cm ² /s)	h_p (cm)	F_0	F_p
B-1-1	1/5	3	0.002	15	6.6	2.06	0.63
B-1-2			0.004	15	6.2	1.46	0.49
B-1-3			0.01	25	11	2.43	0.35
B-1-4				35	5.2	1.54	0.67
B-2-1		3	0.002	15	7.4	2.06	0.53
B-2-2				25	9.8	3.44	0.58
B-2-3			0.004	15	5.8	1.46	0.54
B-2-4				25	9.8	2.43	0.41
B-2-5		22	0.004	35	9.8	3.40	0.58
B-2-6				25	5.4	1.54	0.64
B-2-7			0.01	35	7.4	2.15	0.56
B-2-8				52.5	11	3.23	0.46
B-3-1	1/5	3	0.002	15	7.4	2.06	0.53
B-3-2				25	9.4	3.4	0.62
B-3-3			0.004	35	15	4.8	0.43
B-3-4				15	6.2	1.5	0.49
B-3-5		32	0.004	25	7.8	2.4	0.58
B-3-6				35	9	3.4	0.65
B-3-7			0.01	25	6.2	1.5	0.52
B-3-8				35	7.2	2.2	0.58
B-3-9				52.5	9.4	3.2	0.58

などが考えられる。著者ら¹⁴⁾は、① F_0 が十分に大きければ、急勾配水路であっても F_p ≒一定値になる可能性があること、② F_0 が十分に大きくない場合、すなわち急勾配水路で流入点に近い点で潜入する場合や緩勾配水路で流入点から相当に離れた点で潜入する場合では、そこでの F_p 値が大きく変化することを示した。

一方、初期混合率 γ については、これまでの知見を総括すると、 $\gamma=0\sim2.0$ の範囲の値を取る¹⁾。しかし、流速あるいは密度分布形等の正確な計測が必要なこともあり、ほとんど有益な情報は得られていない。Farrell & Stefan¹³⁾は、 $k-\varepsilon$ モデルを用いた数値実験により、潜入密度流下流端での内部Froude数 F_n との経験式として、 $F_n\geq 0.7$ で $\gamma=0.5$ ($F_n=0.7$)、 $F_n<0.7$ で $\gamma=0$ のように得ている。しかし、 γ を適正に評価するためには、流速・密度

分布を正確に再現する必要があるが、数値実験によって得られた F_p 値は彼らが行った室内実験結果とはかなり異なっている。このため、その再現精度には疑問があると考えられる。著者ら¹⁴⁾は、 γ と F_0 や I との関係を明らかにすることを目的として、潜入密度流領域下端での流速と密度分布を詳細に計測し、 $I=1/150\sim 1/30$ の範囲での γ と I との関係を得ている。

本研究は、以上の背景を踏まえ、前報¹⁴⁾をさらに発展させたものである。特に、ここでは実際問題で重要な緩勾配水路床での潜入密度流に関する情報が欠落していることを踏まえ、混合型貯水池を対象に、限界勾配から緩勾配水路でのデータを収集し、より広範囲な水路床勾配と流入内部Froude数での潜入点と初期混合率について検討を加えた。また、その重要性にもかかわらず、潜入の後に躍層に沿って中層流として貫入する成層型貯水池での潜入現象について、有益な知見が全く得られていないことを踏まえ、流入流出量が比較的少なく1次躍層が強い成層型貯水池を対象に、そこでの潜入点についても検討を加えた。

2. 実験

実験は、混合型貯水池での潜入密度流を対象としたCASE A、成層型貯水池において流入水が潜入を経て、中層密度流として躍層に沿って貫入する場合の潜入密度流を対象としたCASE Bの二通りを実施した。

CASE Aの実験装置は、前面アクリル製の水槽(長さ9.0m、深さ1.2m、幅0.6m)中に長さ1.15mの水平部と下端部が段落ちになった傾斜部よりなる幅0.1mの水路を設置したものである。貯水池部の水路床勾配 I を $1/30\sim 1/150$ の範囲で変化させるとともに、各 I について流入内部Froude数 F_0 を様々に変化させ実験を行った。ここに、 h_0 は水平流入水路の水深である。潜入密度流の流れの定義図と実験条件をそれぞれ図-1Aと表-1Aに示す。CASE Bの実験装置は、アクリル製の水槽(流入水路の長さ=1.0m、貯水池部の長さ=2.85~3.85m、深さ=0.12~0.32m、幅=0.16m)中に $I=1/5$ の斜面とその下流側に躍層を模した水平のアクリル板を設置したものである。下流端は段落ちとなっている。流入水路での水深 h_0 を一定に保ちながら、水平部の水深 h を変化させ、 h/h_0 の影響を調べた。流れの定義図と実験条件をそれぞれ図-1Bと表-1Bに示す。

実験・解析方法としては、CASE Aではスリット光で可視化した潜入点近傍の流況をCCDカメラで撮影した画像をコンピューター解析することで、潜入水深 h_p および界面形状を求めた。ただし、 $I=1/150$ では水路の長さの制約のため、 F_0 が充分大ききところでのデータを収集することはできなかった。また、潜入点から測って $30h_p$ の下流での下層密度流の流速と塩分濃度分布をそれぞれサマール式微流速計と導電率計を用いて計測した。流速分布を積分することで単位幅流量 q_n を得た。さらに、それぞれの分布形状に基づき、後述するモーメント法で、層平均流速 U_n 、層平均有効重力 $B_n(=\epsilon_n g)$ および層厚 h_n を求めた。これらの結果に基づき、初期混合率 γ を、 $\gamma=q_n/q_0-1$ と $\gamma=\epsilon_0/\epsilon_n-1$ の二通りの方法で算定した。

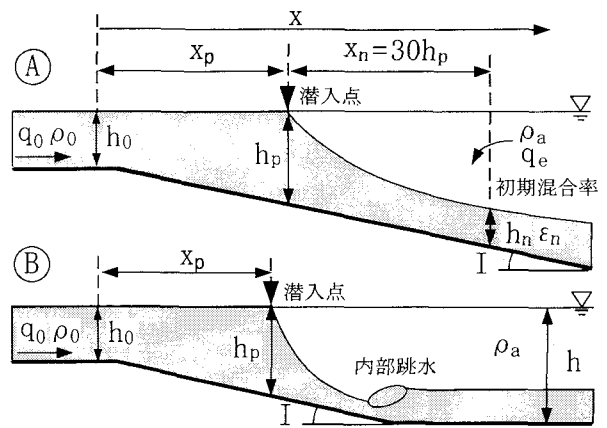


図-1 潜入密度流の流れの定義図

(A:混合型, B:成層型)

一方、CASE Bでは、斜面部で潜入するように流入条件を設定し、CASE Aと同様な手法で潜入水深 h_p のみを求めた。なお、潜入点の位置は、条件によっては時間の経過とともにかなり移動し、 F_p が散らばる要因になる。特に、CASE Aの緩勾配水路では潜入点が安定するまでに、最大で4時間も要することがあった。このため、本研究では潜入点近傍の流況を常時モニターし、安定状態に達したことを確認した後に、全ての測定を手早く実施した。

3. 実験結果

(1) 混合型貯水池での潜入密度流(CASE A)

図-2は、既往の室内実験結果と本研究で得られたデータに基づき、 F_p の頻度分布を示したものである。これより、 F_p は0~1.0の可能な範囲の幅広い値を取ることが確認できる。平均値は0.57である。潜入密度流の特性は、水路床勾配 I に依存する可能性があるため、下層密度流の限界勾配 I_c がどのような値を取るのかを明確にしておく必要がある。ちなみに、Lee & Yu⁹⁾は $I=1/50$ は緩勾配、福岡ら⁸⁾は $1/10$ は急勾配、 $1/60$ は緩勾配としており、著者ら¹⁴⁾は、 $I_c \approx 1/50$ と推定した。

以下では、 $F_p \sim I$ の関係について若干の検討を行う。図-3は、下層密度流の流速分布と密度分布を示したものである。いずれも最大値と最大値を取る距離の半値半幅で無次元化されており、水路床勾配にかかわらず、分布形状はほぼ相似形であることがわかる。図中の実線で示した回帰曲線に基づき、式(3)に定義するモーメント法で、式(5)のように U_n 、 B_n および h_n を求め、下層密度流のFroude数 $F_n(=(q_n^2/\epsilon_n g h_n^3)^{1/2})$ を算定した。ここで、添字 n は下層密度流の特性量であることを示す。 S_1 と S_2 は、式(4)で定義される形状係数であり、 $I=1/150\sim 1/30$ の範囲では、それぞれ約0.7と1.0であった。

$$U_n h_n = \int_0^\infty u dy; U_n B_n h_n = \int_0^\infty u b dy; U_n^2 h_n = \int_0^\infty u^2 dy \quad (3)$$

$$\text{ここに、} S_1 = \int_0^\infty 2b dy; S_2 = \int_0^\infty b dy / Bh \quad (4)$$

$$U_n = \frac{\int_0^\infty u^2 dy}{\int_0^\infty u dy}; B_n = \frac{\int_0^\infty u b dy}{\int_0^\infty u dy}; h_n = \frac{(\int_0^\infty u dy)^2}{\int_0^\infty u^2 dy} \quad (5)$$

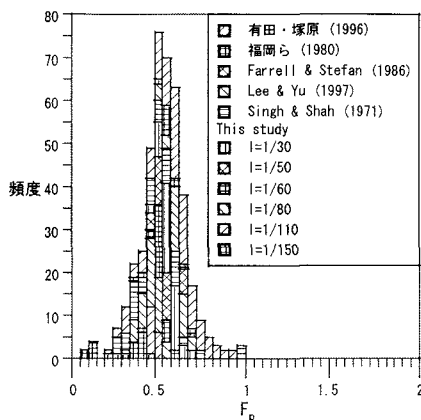


図-2 F_p 値の頻度分布

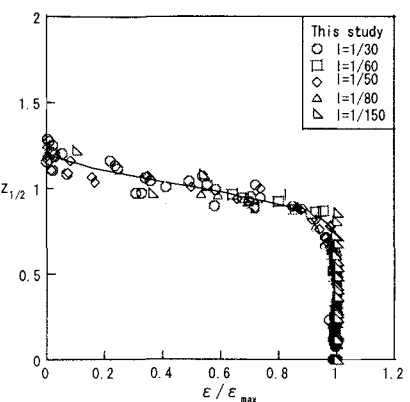
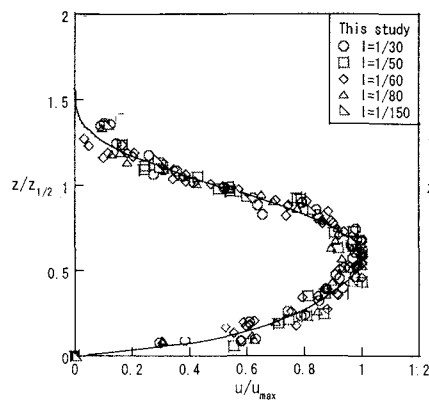


図-3 下層密度流の流速分布と密度分布

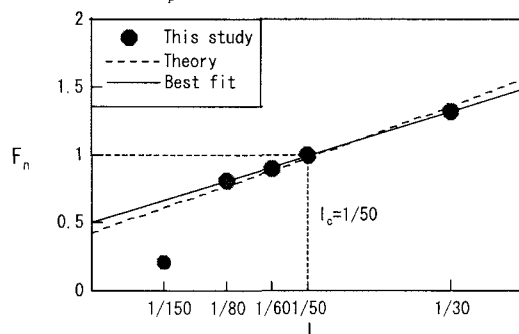


図-4 F_n と I との関係

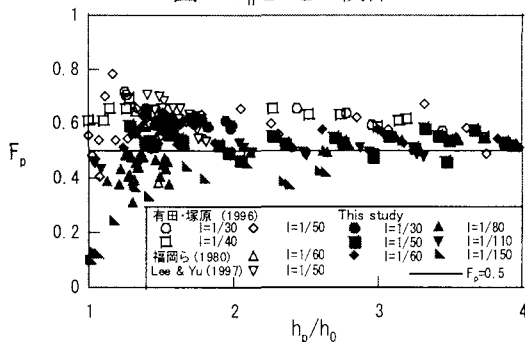


図-6 F_p と h_p/h_0 との関係

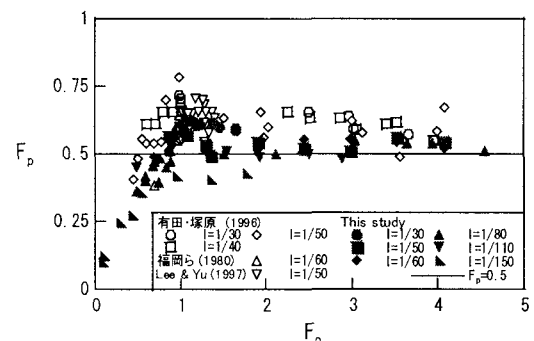


図-5 F_p と F_0 との関係

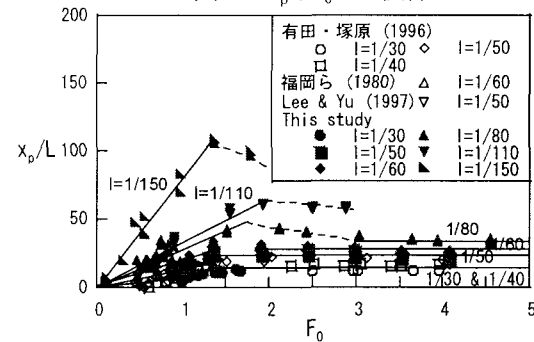


図-7 x_p/L と F_0 との関係

図-4は、このようにして得られた F_n と I との関係について調べたものである。図中の実線は、 $I=1/150$ のデータを除いたベストフィットカーブであり、式(6)で表される。これを除外した理由は、後述するように、実験装置の制約から必ずしも潜行領域下流端での正確な流速、密度分布が得られていると確認できなかったからである。

$$F_n = 25I + 0.5 \quad (6)$$

また、破線は以下で述べる1次元下層密度流の理論に基づき得られた関係である。図-4より、限界勾配は $I_c \approx 1/50$ であることが確認される。これは、著者らのデータを除き、これまで得られた F_p は急勾配あるいは限界勾配に極めて近い緩勾配での値であり、緩勾配での F_p 値に関して有益な情報がほとんど得られていなかったことを意味している。1次元下層密度流の理論より、発達した下層密度流のFroude数 F_0 は式(7)で与えられ、底面傾斜角度 θ が 5° 以上であれば、連行係数 E と θ との関係は、式(8)で与えられる¹⁾。

$$F_n = \frac{S_2 I - S_1 E / 2}{f_b + E} \quad (7) ; \quad E = 0.0009(\theta + 5) \quad (8)$$

図-4には、両式より得られる F_n と I との関係が示してある。これより、 F_n と I との関係はおおよそ予測できることがわかる。ただし、 $\theta < 5^\circ$ ($I < 1/11.4$)での下層密度流の E と I との関係はわかっていないので、式(8)がこの範囲でも成立すると仮定して算定した。また、形状係数は上記の値を用い、 f_b は滑面水路を用いた室内実験結果であることを踏まえ、 $f_b = 0.01$ とした。

図-5は、各水路床勾配ごとの F_p と F_0 との関係を示したものである。図中には $I \leq 1/30$ の既往のデータも同時にプロットされている。 F_p が F_0 と I によって大きく変化することは、有田・塚原²¹⁾によって既に指摘されているが、 F_0 が大きいところでの F_p の挙動はわかっていない。また、彼らの結果は $I=1/3 \sim 1/50$ の範囲での結果であり、限界勾配が $I_c \approx 1/50$ であることから明らかなように、緩勾配水路での結果ではない。図-5より次のことがわかる。 $F_0 = 1.0$ 以下、すなわち h_0 が内部限界水深 h_c より小さい場

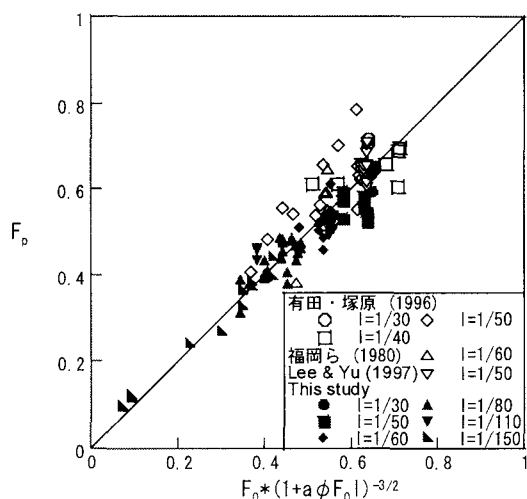


図-8 式 (11) の妥当性の検証

合は、水路床勾配にかかわらず、 F_p は増加する傾向がある。また、急勾配水路では $F_0 \approx 1.0$ で最大値を取るが、緩勾配水路ではそうはならない。 $F_0 \approx 1.0$ 以上では、急勾配水路での F_p は、 F_0 が大きくなるにつれて最大値から徐々に減少し、 $F_p \approx 0.5$ に漸近する。一方、緩勾配水路での F_p は F_0 が大きくなるにつれて徐々に増加し、やはり $F_p \approx 0.5$ に漸近する。これは、 F_0 が大きくなると、 F_p は水路形状の影響を受けない普遍的な値、つまり、 $F_p \approx 0.5$ となるためであると考えられる。一方で潜入するためには必ず $h_p/h_0 \geq 1.0$ であるので、 F_0 が小さければ F_p は限りなく0に近い値を取り得る。このため、潜入点付近の局所的な流れの状態に基づく理論解析^{8), 20)}では、 F_0 と I の影響を受ける範囲での F_p を予測できないことになる。本研究の結果に基づけば、 F_p が流入条件と水路形状の影響を受ける範囲は、緩勾配水路で $F_0 \leq 2.0$ 程度、急勾配水路では $F_0 \leq 4.0 \sim 5.0$ 程度であると考えられる。この範囲での潜入水深を理論的に予測することは不可能であると考えられるので、以下では実験結果に基づき検討を加える。

まず、どのような条件下で $F_p \approx 0.5$ の普遍的な関係が成立するかを明らかにする必要がある。この目的で各水路床勾配ごとの F_p と h_p/h_0 との関係を調べたものが図-6である。データのばらつきのため、各勾配ごとに評価することは難しいが、おおまかには、急勾配水路で $h_p/h_0 \approx 4.0$ 、緩勾配水路で $h_p/h_0 \approx 2.0$ で流入条件と水路形状の影響がほぼなくなるようである。また、水路の幾何学的形状より式(9)の関係があるので、図-6でみた h_p/h_0 は x_p と I で規定されている。ここに、 x_p =流入点から潜入点までの距離である。 h_p/h_0 を無次元距離 x_p/h_0 で表すと、急勾配水路で $x_p/h_0 \approx 3/I$ 、緩勾配水路で $x_p/h_0 \approx 1/I$ となり、 $F_p \approx 0.5$ の関係が成立するのは、流入点から相当離れた地点であることがわかる。

$$h_p/h_0 = 1 + x_p I/h_0 \quad (9)$$

有田²²⁾は、flow force と buoyancy fluxの保存より得られる長さスケール $L (=h_0 \phi)$ を用いて、潜入点までの距離 x_p について検討を加えている。ここに、 $\phi = F_0^{4/3}(1+0.5 F_0^{-2})$ である。これと同様に、 x_p/L と F_0 と

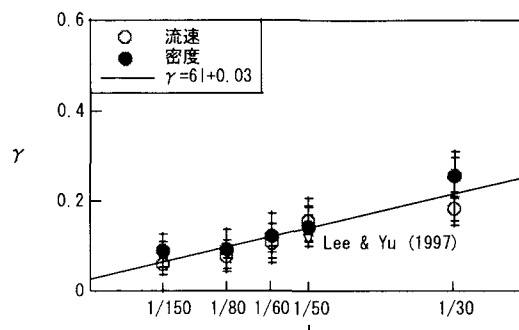


図-9 初期混合率 γ と水路床勾配 I との関係



図-10 CASE Bの流動状況の一例(CASE B-2-4)

の関係を調べたものが図-7である。これより、次のことがわかる。急勾配水路では、 $F_0 \geq 1.0$ で x_p/L はほぼ一定値を取るが、それ以下では x_p/L は増加率 a でほぼ線形的に増加する。一方、緩勾配水路では、 $F_0 = 0 \sim 2.0$ の範囲で x_p/L は線形的に増加し、最大値を取った後に減少する。 $F_0 = 0 \sim 2.0$ の範囲での増加率 a は水路床勾配に応じて変化する。図-7に基づけば、各水路床勾配 I での増加率 a は、 $I=1/30, 1/50, 1/60, 1/80, 1/110$ および $1/150$ で、それぞれ $a \approx 8, 13, 20, 32, 33$ および 80 のようになる。

図-8は、式(9)と式(10)より得られる式(11)の妥当性を検証した図であり、ほぼこの関係が成立していることが確認できる。

$$x_p/L = aF_0 \quad (10) \quad ; \quad F_p/F_0 = (1 + a\phi F_0 I)^{-3/2} \quad (11)$$

初期混合率 γ について検討を加える。流速と塩分濃度分布の両測定結果から得られた q_n に基づき算定された初期混合率 γ と水路床勾配 I との関係について調べたものが図-9である。データのばらつきは認められるが、いずれの測定結果からも γ は I に依存していることが見て取れる。これより、 $I=1/150 \sim 1/30$ の範囲では、 γ は式(12)で表せると考えられる。ただし、先述した理由から、 $I=1/150$ の γ 値はやや傾向が異なっている。なお、図中の矢印はエラーバーである。 $I=1/50$ でのLee & Yu⁹⁾の結果は $\gamma \approx 0.17$ となっており、本研究で得られた γ 値とはほぼ一致している。また、式(6)と式(12)より、先述したFarrell & Stefan¹³⁾の経験式と類似した関係式として、 $\gamma \approx 0.24(F_0 - 0.5)$ の関係が得られる。

$$\gamma \approx 0.03 + 6I \quad (12)$$

(2) 成層型貯水池での潜入密度流(CASE B)

成層I型ダム貯水池において流入水が潜入を経て、中層密度流として躍層に沿って貫入する場合の潜入点について若干の検討を加える。図-10にCASE Bの流動状況の一例を示す。図-11は、CASE Bの F_p と F_0 との関係について調べたものである。図中には、CASE Bの水路床勾配が $I=1/5$ であることを踏まえ、有田・塚原²⁰⁾によって得ら

れた, CASE A の状況での $I=1/4 \sim 1/7$ の範囲での実験結果を示してある. これより, 少なくとも $h/h_0=3.0 \sim 10.6$ の範囲では, h/h_0 の影響は認められないようである. また, F_0 の増加に伴い F_p が減少する弱い傾向があるようにも見て取れるが, 明確ではない. いずれにせよ, 全体的に $F_p=0.5$ よりやや大きい値を取っているが, 有田・塚原による $I=1/5$ の結果を勘案すると, $F_0 \geq 2.0$ での F_p 値の傾向は, 混合型貯水池と大きな違いがないようである. ただし, F_0 がそれより小さいところでは, $I=1/7$ の結果と比較すると, F_p 値は相当小さくなっている. 今回の実験では斜面が急勾配であり, 図-10 から明らかなように, そこでの流れが射流であり, 斜面下端で内部跳水が発生している. このため, 通常の潜入に伴う補償流のみならず, 内部跳水に伴う同様な影響も考えられることから, 急勾配水路での内部跳水の影響や緩勾配での F_p 値のふるまいなど, さらなる検討が必要であると考えられる.

4. まとめ

本研究より, 以下のような結論が得られた.

(1) 混合型貯水池では, F_p が流入条件 (F_0) と水路形状 (I) の影響を受ける範囲は, 緩勾配水路で $0 < F_0 \leq 2.0$ 程度, 急勾配水路では $0 < F_0 \leq 4.0 \sim 5.0$ 程度である. この範囲以外では, 潜入点の内部 Froude 数 F_p は, $F_p=0.5$ の値を取る. $F_0=0 \sim 1.0$ での潜入点の内部 Froude 数 F_p は, 式(11)で与えられる. その中間の F_0 では各水路勾配に応じて変化する. また, 初期混合率 γ は式(12)で与えられる. なお, 限界勾配 I_c は約 $1/50$ である.

(2) 成層型貯水池では, F_0 が大きいところでは, 混合型貯水池での F_p 値と大きな違いはない. しかし, F_0 が小さいところでの混合型貯水池の結果と比較すると, F_p は小さくなる. ただし, 限られた条件下での結果であり, さらなる検討が必要であると考えられる.

今後は, 混合型貯水池において, 流入条件や水路形状が潜入密度流に及ぼす影響について検討を加えるとともに, 室内実験では難しい条件での現象解明に向けて, 数値モデルの開発に取り組む予定である.

参考文献

- 1) 秋山壽一郎: 流入型密度流の水利特性とその予測, 湖沼, 貯水池の管理に向けた富栄養化現象に関する学術研究のとりまとめ, 土木学会水利委員会, 環境水利部会, pp.69-167, 2000.
- 2) 久保直也ら: 風屋貯水池における淡水赤潮現象と貯水池環境, 大ダム, No.126, pp.18-25, 1988.
- 3) 畑 幸彦: 永瀬ダム湖(高知県)の淡水赤潮, 水質汚濁研究, Vol.14, No.5, pp.25-29, 1991.
- 4) 中本信忠: 神流湖の淡水赤潮, 水質汚濁研究, Vol.14, No.5, pp.13-17, 1991.
- 5) 山田正人, 宗宮功, 小野芳朗, 小林尚礼: ダム貯水池における *Peridinium* 淡水赤潮の集積機構の評価, 水環境学会誌, 第18巻, 第10号, pp.775-783, 1995.
- 6) 松尾直規, 山田正人, 宗宮功: 貯水地上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係, 水工学論文集, 第40巻, pp.575-581, 1996.

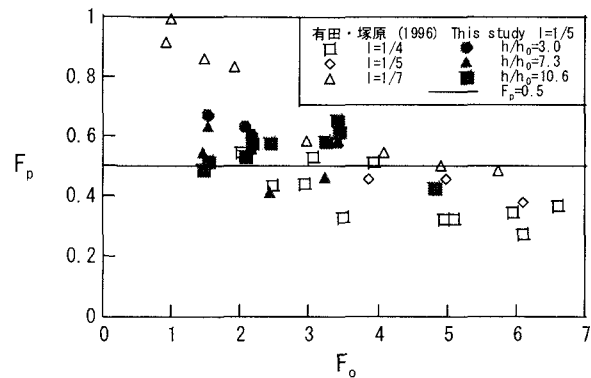


図-11 水路Bにおける F_p と F_0 との関係

- 7) 天野邦彦, 田中康泰, 鈴木宏明, 安田佳哉: 貯水池末端における持続的な淡水赤潮に関する研究, 水工学論文集, 第44巻, pp.1083-1088, 2000.
- 8) 福岡捷二, 福岡祐介, 中村健一: 2次元貯水池潜入密度流の潜り込み水深と界面形状, 土木学会論文報告集, 第302号, pp.55-65, 1980.
- 9) Lee, H.Y. & Yu, W.S.: Experimental study on reservoir turbidity current, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.123, No.6, pp.520-528, 1997.
- 10) Elder, R.A. & Wunderlich, W.O.: Inflow density currents in TVD reservoirs, *Int'l Symp. Stratified Flows*, IAHR/ASCE, Novosibirsk, USSR, pp.221-236, 1972.
- 11) Akiyama, J. & Stefan, H.G.: Plunging flow into a reservoir: theory, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.110, HY.4, pp.484-498, 1984.
- 12) Akiyama, J. & Stefan, H.G.: Onset of underflow in slightly diverging channels, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.113, No.7, pp.825-844, 1987.
- 13) Farrell, G.J. & Stefan, H.G.: Mathematical modeling of plunging reservoir flows, *J. of Hydraulic Research*, Vol.26, No.5, pp.525-537, 1988.
- 14) 秋山壽一郎, 西 恭太, 浦 勝: 潜入密度流の流動特性とフェンス工による流動制御, 水工学論文集, 第47巻, pp.1177-1282(2003).
- 15) Singh, B. & Shah, C.R.: Plunging phenomena of density currents in reservoirs, *La Houille Blanche*, Vol.26, No.1, pp.59-64, 1971.
- 16) Hebbert, B. et al.: Collie river underflow into the Wellington reservoir, *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.105, HY.5, pp.533-545, 1979.
- 17) Ford, D.F. et al.: Density inflows to Degray lake, Arkansas, *Proc. of Second Int'l Symposium on Stratified Flows*, Trondheim, Norway, pp.977-987, 1980.
- 18) 菅 和利, 玉井信行: 貯水池潜入部の潜り点及び初期混合に関する研究, 第25回水理講演会論文集, pp.631-636, 1981.
- 19) Hauenstein, W. & Dracos, T.H.: Investigation of plunging density currents generated by inflows in lakes, *J. of Hydraulic Research*, Vol.22, No.3, pp.157-179, 1984.
- 20) Savage, S.B. & Brimberg, J.: Analysis of plunging phenomena in water reservoirs, *J. of Hydraulic Research*, Vol.13, No.2, pp.187-204, 1975.
- 21) 有田正光, 塚原千明: 貯水池密度流の潜り点の水利条件に関する実験的研究, ながれ, 第15巻, pp.409-416, 1996.
- 22) 有田正光: 貯水池密度流の潜り点の水利条件に関する解析的研究, 水工学論文集, 第40巻, pp.567-574, 1996.

(2003. 9. 30受付)